Guia de Instruções de Medição com o Sonelastic® para:

Amostras de Concreto Cilíndricas

ATCP Engenharia Física
www.atcp.com.br
São Carlos – Brasil

Índice

1. PREPARO DO CORPO DE PROVA CILÍNDRICO 3
1.1. Colagem das “Orelhas” para excitação do modo torcional 3
1.2. Marcação dos pontos de apoio do corpo de prova 3
2. OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES, MASSA E RESPECTIVAS INCERTEZAS 4
3. POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA CILÍNDRICO NO SUPORTE DE AMOSTRAS 5
3.1. Para obtenção do Modo Longitudinal 5
3.2. Para obtenção do Modo Flexional 5
3.3. Para obtenção do Modo Flexional + Torcional 6
4. AQUISIÇÃO (REALIZAÇÃO E AJUSTES) DA RESPOSTA ACÚSTICA 6
5. PROCESSAMENTO DO SINAL 7
5.1. Determinação do Módulo Elástico (E) e da Velocidade do Som (Vs) através do modo longitudinal 7
5.2. Determinação do Módulo Elástico (E) e da Velocidade do Som (Vs) através do modo flexional 8
5.3. Determinação dos Módulos Elásticos (E, G e μ) e da Velocidade do Som (Vs) através do modo flexional e do modo torcional 8
6. ARMAZENAMENTO DOS RESULTADOS 9
7. ANEXO A: FUNDAMENTOS TEÓRICOS 10
7.1. Técnica de excitação por impulso 10
7.2. Ressonância flexional 10
7.3. Ressonância torcional 11
7.4. Ressonância longitudinal 12
7.5. Amortecimento 13

1. PREPARO DO CORPO DE PROVA CILÍNDRICO

1.1. Colagem das "Orelhas" para excitação do modo torcional

Para excitar o modo de vibração torcional deve-se colar dois pequenos retângulos feitos de alumínio com dimensões aproximadas de 15 x 10 x 3 mm (comprimento x largura x espessura) nas laterais do cilindro, conforme mostra a Figura 1.

As chamadas "orelhas" serão os locais de impacto e captação do sinal acústico. A colagem é feita com cola Durepox.

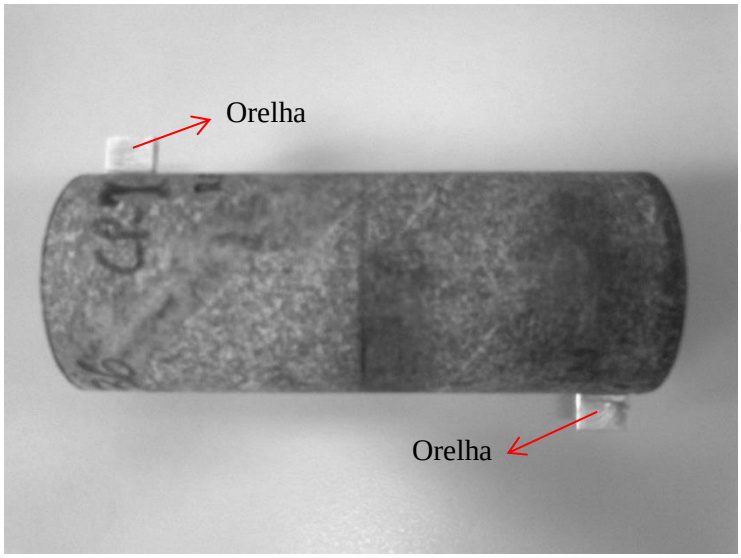

Figura 1. Fixação das "orelhas" em um corpo de prova de concreto no formato cilíndrico.

No esquema abaixo temos uma vista de frente e uma vista de cima do corpo de prova cilíndrico com as "orelhas" fixadas.

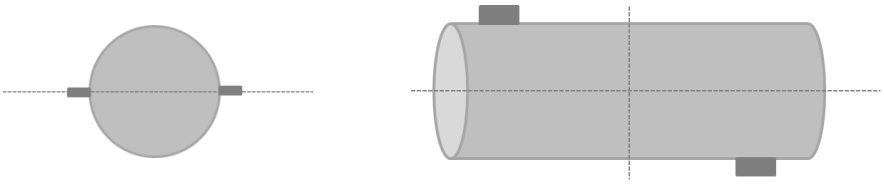

Figura 2. Vista de frente (à esquerda) e vista de cima (à direita) de uma amostra de concreto cilíndrico com as "orelhas" fixadas.

1.2. Marcação dos pontos de apoio do corpo de prova

Os corpos de prova devem ser apoiados nos chamados pontos nodais (Norma ASTM E-1876) para favorecer a excitação dos modos de vibração de interesse (flexional, torcional e longitudinal).

Estes pontos estão localizados a 0,224 L de cada extremidade, sendo L o comprimento do corpo de prova.

Exemplo.
Dimensões do corpo de prova:
L = 300 mm
d = 150 mm

Onde L é o comprimento do cilindro e d é o diâmetro do cilindro.

Pontos nodais: 0,224L
0,224 x 300 = 67,20 mm

Portanto, o corpo de prova deve ser apoiado a uma distância de 67,20 mm de cada extremidade. Veja o esquema abaixo:

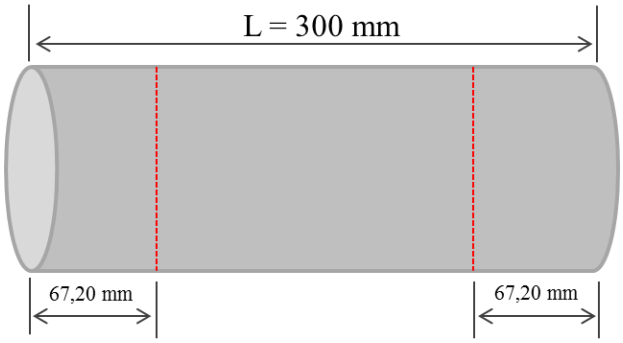

Figura 3. Pontos de apoio do corpo de prova cilíndrico em destaque (traços vermelhos); localizados a 0,224L de cada extremidade.

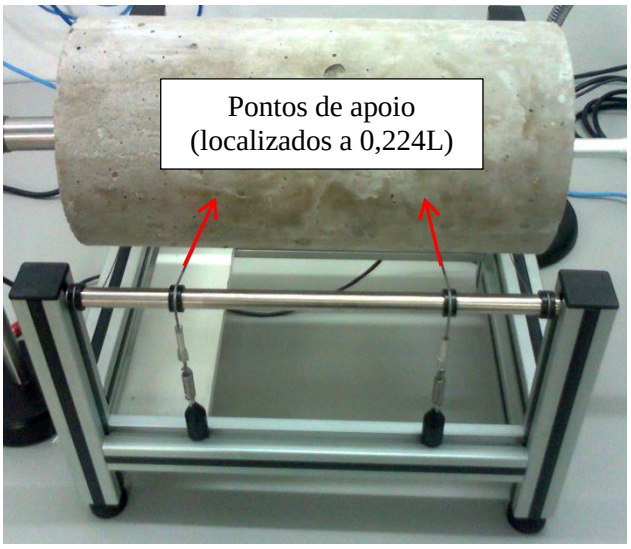

Figura 4. Caracterização de um corpo de prova cilíndrico.

2. OBTENÇÃO DAS DIMENSÕES, MASSA E RESPECTIVAS INCERTEZAS

Utilize um paquímetro e/ou uma régua para obter as dimensões dos corpos de prova e uma balança de precisão para obter a massa. As dimensões *L* (comprimento) e *d* (diâmetro) devem ser mensuradas em três pontos diferentes. Os valores são armazenados com o auxílio de uma planilha no Excel fornecida juntamente com este Guia de Instruções de Medição com o Sonelastic. Os valores médios e o desvio padrão são calculados pelo Excel.

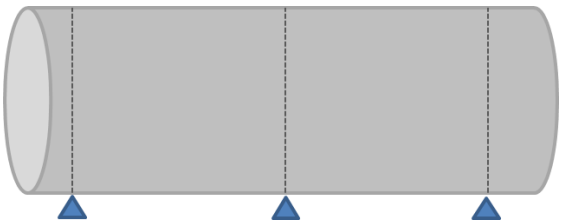

Figura 5. Marcação dos pontos de medição do diâmetro (d) do corpo de prova.

Figura 6. Marcação dos pontos de medição do comprimento (L) do corpo de prova.

3. POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA CILÍNDRICO NO SUPORTE DE AMOSTRAS

Apoie o corpo de prova cilíndrico de tal forma que os fios de contenção estejam localizados exatamente nos pontos nodais (0,224L) marcados anteriormente (Figuras 3 e 4).

3.1. Para obtenção do Modo Longitudinal

O impulso deve ser dado em uma das extremidades do corpo de prova e o sinal captado na extremidade oposta. Veja o exemplo na Figura abaixo.

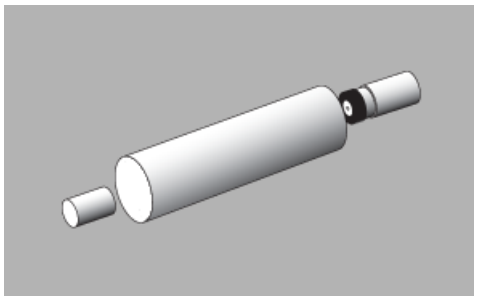

Figura 7. Localização do captador acústico e do pulsador para obtenção do Modo Longitudinal.

3.2. Para obtenção do Modo Flexional

O impulso e a captação do sinal devem ser no centro do corpo de prova.

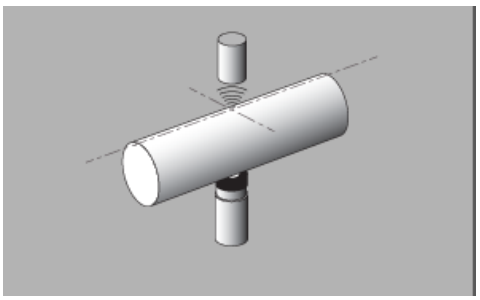

Figura 8. Localização do captador acústico e do pulsador para obtenção do Modo Flexional.

3.3. Para obtenção do Modo Flexional + Torcional

O impulso deve ser dado em uma das "orelhas" fixadas no corpo de prova e a captação do sinal deve ser na outra "orelha".

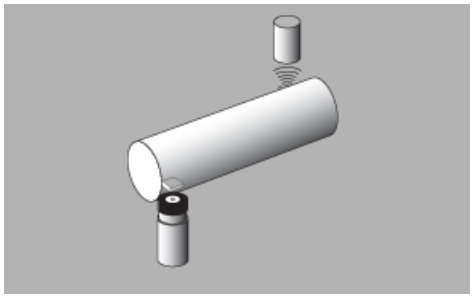

Figura 9. Localização do captador acústico e do pulsador para obtenção do Modo Torcional

4. AQUISIÇÃO (REALIZAÇÃO E AJUSTES) DA RESPOSTA ACÚSTICA

Carregue um dos arquivos Sonelastic® fornecidos como modelo juntamente com este Guia de Instruções de Medição com o Sonelastic.

Na aba "Acquisition" escolha a geometria da amostra (cilíndrica) e forneça as dimensões e massa, com as respectivas incertezas.

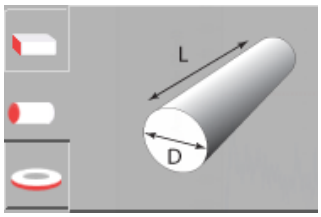

Figura 10. Tela do Software Sonelastic® para escolha da geometria da amostra.

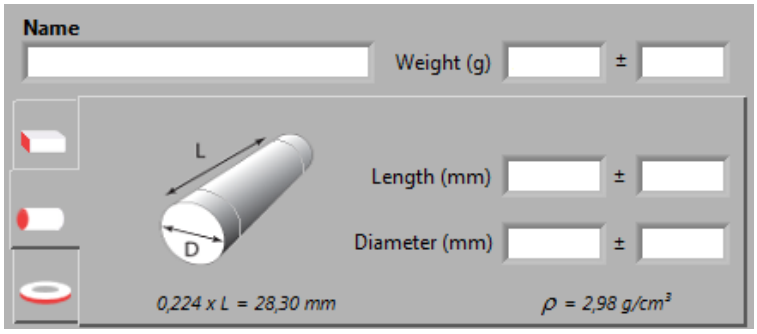

Figura 11. Tela do Software Sonelastic® para inserção das dimensões e massa do corpo de prova e suas respectivas incertezas.

"Clique" no botão "Acquisition (F1)" e dê o impulso para geração do sinal que será capturado pelo captador acústico e processado pelo Software.

5. PROCESSAMENTO DO SINAL

5.1. Determinação do Módulo Elástico (E) e da Velocidade do Som (Vs) através do modo longitudinal

Posicione o pulsador e o captador acústico de forma a favorecer a obtenção dos modos longitudinais (Figura 7). Na aba de cálculos dos Módulos Elásticos ("Elastic Properties") selecione a opção "Single Longitudinal".

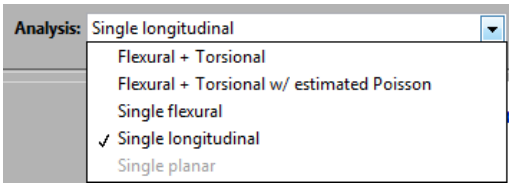

Figura 12. Tela para escolha do tipo de análise utilizada.

A Figura 13 ilustra o espectro obtido na caracterização de corpos de prova cilíndricos com excitação do modo longitudinal (frequência longitudinal em destaque).

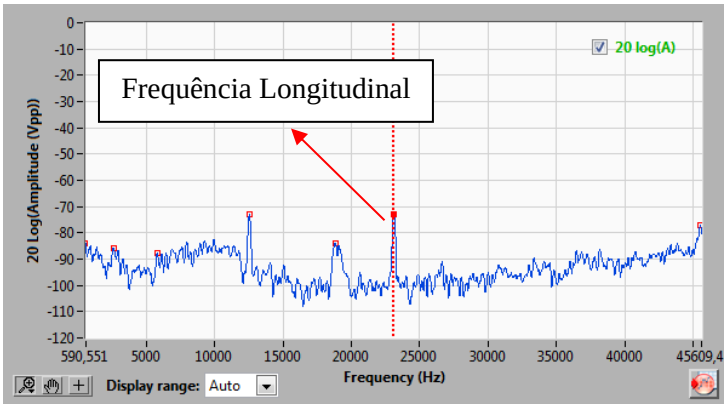

Figura 13. Gráfico para obtenção do Módulo Elástico através da frequência longitudinal (em destaque).

5.2. Determinação do Módulo Elástico (E) e da Velocidade do Som (Vs) através do modo flexional

Posicione o pulsador e o captador acústico de forma a favorecer a obtenção dos modos flexionais (Figura 8). Na aba de cálculos dos Módulos Elásticos ("Elastic Properties") selecione a opção "Single Flexural".

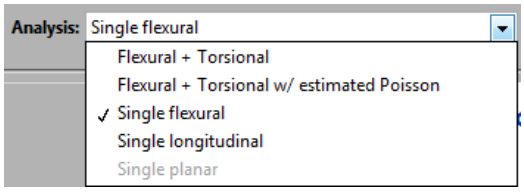

Figura 14. Tela para escolha do tipo de análise utilizada.

Na Figura 15 temos um gráfico típico da caracterização de corpos de prova cilíndrico com excitação do modo flexional. Observe que a frequência flexional é o primeiro pico e possui maior amplitude.

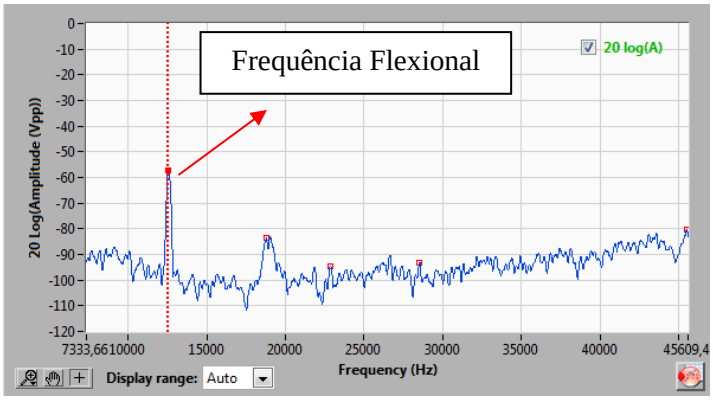

Figura 15. Gráfico para obtenção do Módulo Elástico através da frequência flexional (em destaque).

5.3. Determinação dos Módulos Elásticos (E, G e μ) e da Velocidade do Som (Vs) através do modo flexional e do modo torcional

Posicione o pulsador e o captador acústico de forma a favorecer a obtenção dos modos flexionais e torcionais (Figura 9). Na aba de cálculos dos Módulos Elásticos ("Elastic Properties") selecione a opção "Flexural + Torsional".

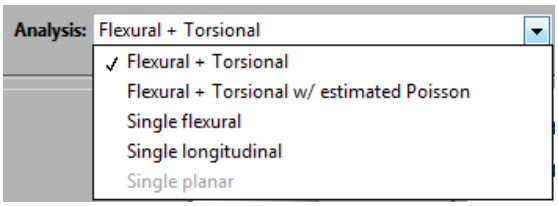

Figura 16. Tela para escolha do tipo de análise utilizada.

O gráfico da Figura 17 mostra os picos de ambas as frequências, flexional e torcional. A flexional aparece sempre em primeiro, seguida pela frequência torcional.

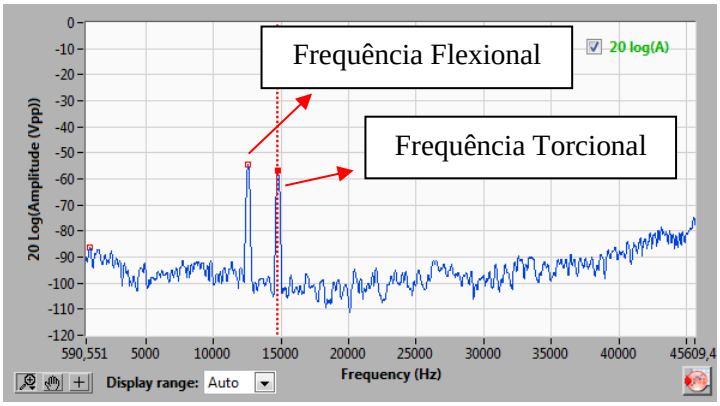

Figura 17. Gráfico para obtenção dos Módulos Elásticos através da frequência flexional e da torcional (em destaque).

6. ARMAZENAMENTO DOS RESULTADOS

Para exportar os resultados e abri-los posteriormente através do Programa Excel, "clique" na aba "Exported Results" e em seguida na opção "Exported excel".

Para salvar os arquivos de medições do Software Sonelastic® "clique" na opção "Save File (F4)". Estes arquivos podem ser lidos por qualquer computador que tenha o Software instalado e para carregá-los basta "clicar" na opção "Load File (F3)".

Nota: Para maiores detalhes consulte o Manual de Instalação e Operação do Software Sonelastic®.

7. ANEXO A: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

7.1. Técnica de excitação por impulso

A técnica de excitação por impulso consiste em um método dinâmico não-destrutivo, que permite o cálculo dos módulos elásticos e do amortecimento a partir do som emitido pelo corpo de prova ao sofrer uma pequena pancada mecânica. Este som, ou resposta acústica, é composto pelas frequências naturais de vibração do corpo que são proporcionais aos módulos elásticos.

Para geometrias simples, como barras, cilindros, discos e placas, existe uma relação unívoca entre as frequências naturais de vibração com as dimensões e massa do corpo de prova, parâmetros facilmente mensuráveis com um paquímetro e uma balança. Conhecendo-se as dimensões, a massa e as frequências naturais de vibração, o cálculo dos módulos elásticos com o equipamento Sonelastic é imediato.

Para realização da caracterização, o corpo de prova deve ser posicionado e apoiado por um suporte adequado à sua geometria e às condições de contorno e precisão desejadas. Em seguida, o mesmo é excitado através de uma leve pancada mecânica através de um pulsador que pode ser manual ou automático (pulsador eletromagnético). A resposta acústica é então captada por um captador acústico e processada pelo Software Sonelastic (tecnologia PC Based) ou pelo Hardware Sonelastic (tecnologia Stand Alone), que calcula os módulos elásticos e o amortecimento a partir das frequências naturais de vibração (frequências de ressonância). O amortecimento é calculado pelo método do decremento logarítmico a partir da taxa de atenuação do sinal.

7.2. Ressonância flexional

O modo de vibração flexional permite o cálculo do módulo de Young a partir do uso de uma razão de Poisson estimada.

Barra de secção retangular:[1]

$$E = 0{,}9465\left(\frac{m f_f^2}{b}\right)\left(\frac{L^3}{t^3}\right)T_1 \qquad \textbf{(1)}$$

em que E é o módulo de Young (Pa), m é a massa da barra (g), L o comprimento (mm), b a largura (mm) e t a altura da barra (mm); f_f é a frequência de ressonância fundamental flexional (Hz) e T_1 é um fator de correção para o modo fundamental flexional, que depende da razão de Poisson μ e da razão de aspecto da barra dado por:

$$T_1 = 1 + 6{,}585\,(1 + 0{,}0752\mu + 0{,}8109\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0{,}868\left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8{,}340\,(1+0{,}2023\mu+2{,}173\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^4}{1{,}000+6{,}338\,(1+0{,}1408\mu+1{,}536\mu^2)\left(\frac{t}{L}\right)^2}\right] \qquad \textbf{(2)}$$

A frequência flexional fundamental é preferida no caso de barras delgadas por ser a primeira frequência de ressonância, o que facilita sua identificação.

[1] ASTM E 1876 – 07; Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ***ASTM Standard.*** 2007. 15 p.

Barra de secção circular:[1]

$$E = 1{,}6067\left(\frac{L^3}{D^4}\right)(mf_f^2)T_1' \qquad \textbf{(3)}$$

em que D é o diâmetro (mm), f_f é a frequência de ressonância fundamental flexional (Hz) e T_1' é um fator de correção para o modo fundamental flexional dado por:

$$T_1' = 1 + 4{,}939\,(1 + 0{,}0752\mu + 0{,}8109\mu^2)\left(\frac{D}{L}\right)^2 - 0{,}4883\left(\frac{D}{L}\right)^4 - \left[\frac{4{,}691\,(1+0{,}2023\mu+2{,}173\mu^2)(\frac{D}{L})^4}{1{,}000+4{,}754(1+0{,}1408\mu+1{,}536\mu^2)(\frac{D}{L})^2}\right] \qquad \textbf{(4)}$$

A Figura 1 mostra os pontos nodais flexionais (pontos de apoio das amostras), bem como os locais de impacto e de captação da vibração desejada.

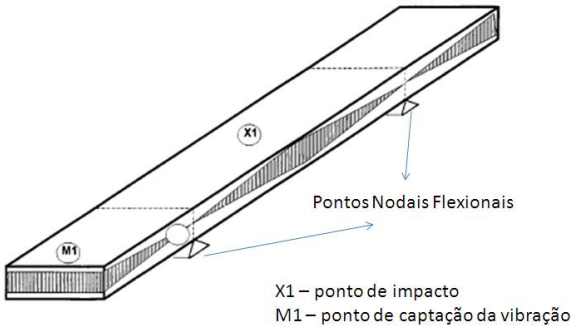

Figura 1: Barra de secção retangular excitada para captação das frequências flexionais.[2]

7.3. Ressonância torcional

O modo de vibração torcional permite o cálculo do módulo de cisalhamento.

Barra de secção retangular:[1]

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt}R \qquad \textbf{(5)}$$

em que G é o módulo de cisalhamento (Pa), f_t é a frequência de ressonância fundamental torcional (Hz) e R é um fator dependente da relação entre a largura e altura da amostra dado por:

$$R = \left[\frac{1+\left(\frac{b}{t}\right)^2}{4-2{,}521\frac{t}{b}\left(1-\frac{1{,}991}{e^{\pi\frac{b}{t}}+1}\right)}\right]\left[1+\frac{0{,}00851\,n^2\,b^2}{L^2}\right] - 0{,}060\,(\frac{nb}{L})^{\frac{3}{2}}(\frac{b}{t}-1)^2 \qquad \textbf{(6)}$$

[1] ASTM E 1876 – 07; Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ***ASTM Standard.*** 2007. 15 p.
[2] Modificada de [1].

Corpos de prova cilíndricos:[1]

$$G = 16\, m f_t^2 \left(\frac{L}{\pi D^2}\right) \qquad \textbf{(7)}$$

Para materiais isotrópicos a razão de Poisson se relaciona com E e G como dado pela equação abaixo:

$$\mu = \left(\frac{E}{2G}\right) - 1 \qquad \textbf{(8)}$$

onde μ é a razão de Poisson, *E* é o módulo de Young (Pa) e *G* é o módulo de cisalhamento (Pa).

A Figura 2 mostra os pontos nodais torcionais (pontos de apoio das amostras), bem como os locais de impacto e de captação da vibração desejada.

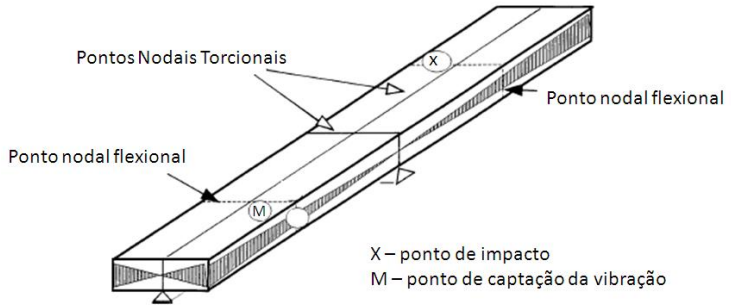

Figura 2: Barra de secção retangular excitada para captação das frequências torcionais.[2]

7.4. Ressonância longitudinal

O modo longitudinal também pode ser utilizado no cálculo do módulo de Young; basta excitar longitudinalmente o corpo de prova.

Corpos de prova de secção retangular:[3]

$$E = 4\left(\frac{m f_l^2}{b}\right)\left(\frac{L}{t}\right) \qquad \textbf{(9)}$$

em que *E* é o módulo de Young (Pa), *m* a massa (Kg), *b* a largura da barra (m), *L* o comprimento (m), *t* a altura (m) f_f a frequência do modo longitudinal fundamental (Hz).

[1] ASTM E 1876 – 07; Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ***ASTM Standard.*** 2007. 15 p.
[2] Modificada de [1].
[3] ASTM C 215 – 08; Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. ***ASTM Standard.*** 2010. 7 p.

Corpos de prova cilíndricos:[1]

$$E = 5{,}093\left(\frac{L}{d^2}\right) m\, f_l^2 \qquad \textbf{(10)}$$

O cálculo pode ser feito utilizando-se a densidade do material, como mostra a Equação (11):

$$E = 4\, L^2 \rho\, f_l^2 \qquad \textbf{(11)}$$

A Figura 3 mostra a localização do ponto nodal longitudinal (ponto de apoio das amostras), bem como os locais de impacto e de captação da vibração.

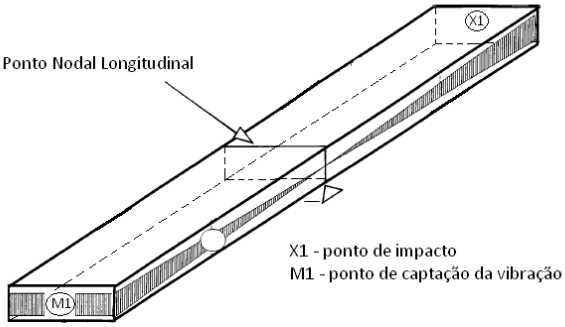

Figura 3: Barra de secção retangular excitada para captação da frequência longitudinal.[2]

7.5. Amortecimento

O amortecimento, assim como os módulos elásticos, é calculado automaticamente pelo Software Sonelastic. O método utilizado nos cálculos é o do decremento logarítmico que consiste na razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal e o modelo usado é o do amortecimento viscoelástico.

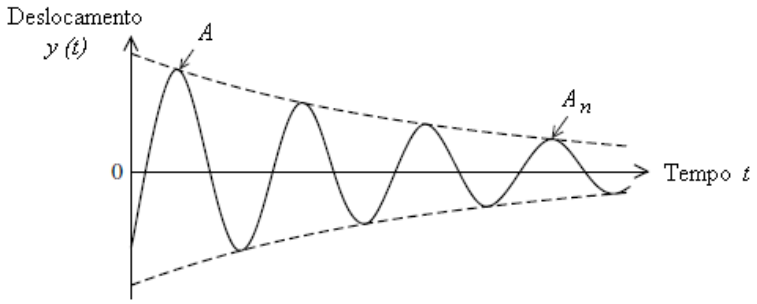

Figura 4: Resposta ao impulso para um oscilador simples.

O decaimento no tempo (Figura 4) é dado por:

[1] ASTM C 215 – 08; Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. ***ASTM Standard.*** 2010. 7 p.
[2] Modificada de ASTM E 1876 – 07; Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ***ASTM Standard.*** 2007. 15 p.

$$y\,(t) = \; y\, e^{-\zeta\omega_0 t}\,\sin(\omega_d t) \qquad \textbf{(12)}$$

onde ω_d é a frequência natural amortecida, dada por: $\omega_d = \omega_0\sqrt{1-\zeta^2}$. Se a resposta no tempo $t = t_n$ é denotada por A, e a resposta no tempo $t = t_n + 2\pi\ r\ /\ \omega_d$ é denotada por A_n, então:

$$\frac{A_n}{A} = \exp\left(-\zeta\frac{\omega_0}{\omega_d}\,2\pi\,r\right) = \exp\left[-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\,2\pi r\right] \qquad \textbf{(13)}$$

Assim, o decremento logarítmico (δ), é obtido por:

$$\delta = \frac{1}{\mathrm{n}}\ln\left(\frac{A}{A_n}\right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \qquad \textbf{(14)}$$

e o amortecimento (ζ):

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}} \qquad \textbf{(15)}$$

Quando o amortecimento é baixo ($\zeta < 0{,}1$), a frequência de amortecimento é praticamente igual à frequência natural, ou seja, $\omega_d \cong \omega_0$, e então a Equação 13 pode ser escrita como:

$$\frac{A_n}{A} \cong \exp(-\zeta 2\pi\, r) \qquad \textbf{(16)}$$

ou ainda,

$$\zeta = \frac{1}{2\pi}\ln(\frac{A}{A_n}) = \frac{\delta}{2\pi} \qquad \text{para } \zeta < 0{,}1 \qquad \textbf{(17)}$$

Contato:
ATCP Engenharia Física
www.atcp.com.br
apl@atcp.com.br
(16) 3307-7899